



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# Βελτιστοποιώντας τη διαχείριση των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων : από τη συνεργατική λειτουργία του συστήματος στροβίλων στην ημερήσια πρόγνωση της ενέργειας



ΔΡΑΚΑΚΗ ΚΟΡΙΝΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

Επιβλέπων Καθηγητής : Ευστρατιάδης Ανδρέας Επίκουρος Καθηγητής , Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

# Κίνητρα και πρακτική αξία της παρούσας έρευνας

- Το νέο θεσμικό πλαίσιο που η Ευρωπαϊκή Ένωση εισάγει στην αγορά ενέργειας , γνωστό με την ονομασία “Target Model”, αποβλέπει στην δημιουργία ενιαίας Ευρωπαϊκής αγοράς αλλάζοντας έτσι το επίπεδο ανταγωνισμού με στόχο την μεγιστοποίηση του οφέλους των αγοραστών.
- Η μελλοντική είσοδος των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων (ΜΥΕ) στο χρηματιστήριο ενέργειας γεννά την ανάγκη επιπλέον έρευνας γύρω από τον βέλτιστο προγραμματισμό τους και την αξιόπιστη πρόγνωση παραγόμενης ενέργειας.
- Η ιδιαιτερότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω της άμεσης εξάρτησής τους από τα καιρικά φαινόμενα, τίθεται κρισιμότερη στην κατηγορία ΜΥΕ χωρίς αποθήκευση, περίπτωση την οποία επιλέξαμε να μελετήσουμε.

# Παρουσίαση του αντικείμενου έρευνας

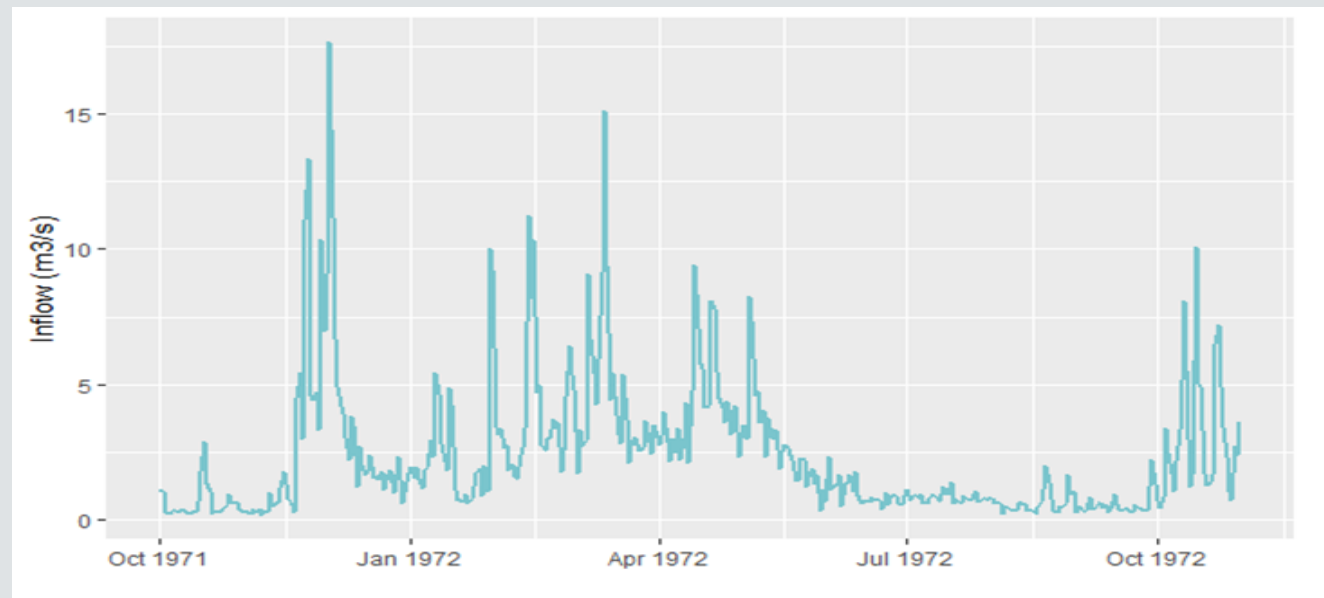
- Ο στόχος της παρούσας έρευνας είναι διττός :
  1. Βελτιστοποίηση της έκφρασης του κανόνα λειτουργίας του συστήματος στροβίλων.
  2. Δημιουργία αξιόπιστων μοντέλων πρόγνωσης της παραγόμενης ενέργειας.

Η από κοινού εφαρμογή των δύο παραπάνω βημάτων, εξασφαλίζει την αποδοτικότερη “εκμετάλλευση” του έργου από τον χρήστη.



# Περιοχή μελέτης και πιλοτικό έργο

- Υποθετικό ΜΥΗΕ εκτροπής στον Αχελώο, με ύψος πτώσης 150 m
- Αναγωγή δεδομένων παροχής από το φράγμα των Κρεμαστών στον Αχελώο (Δ. Ελλάδα), θεωρώντας ότι στη θέση του ΜΥΗΕ παράγεται το 1:40 των εισροών στον ταμιευτήρα.
- Ημερήσια δεδομένα για 39 έτη (Μάιος 1969-Δεκέμβριος 2008).
- Μέση ημερήσια παροχή: 2.15 m<sup>3</sup>/s.
- Εκτίμηση ημερήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης στη λεκάνη ανάντη του ΜΥΗΕ από σημειακά δείγματα δέκα βροχομετρικών σταθμών.



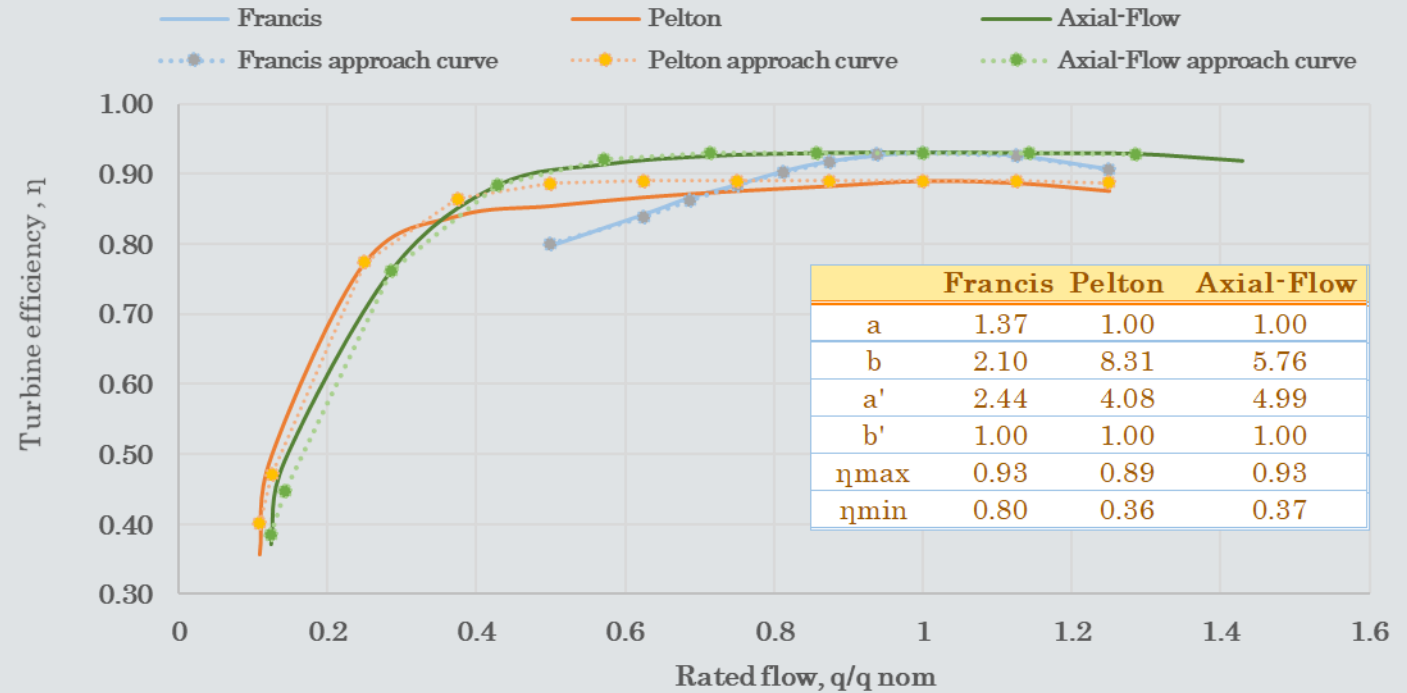
# Μείγμα στροβίλων

- Αμελητέα αποθηκευτική ικανότητα έργου  $\rightarrow$  Σχεδιασμός του συστήματος με μείγμα στροβίλων διαφορετικής δυναμικότητας – μεγάλος (1), μικρός (2) – με σκοπό την εκμετάλλευση κατά το δυνατό μεγαλύτερου εύρους παροχών.
- Στη γενική περίπτωση  $N$  στροβίλων, με εύρος παροχών λειτουργίας για κάθε στρόβιλο  $(q_{i,min}, q_{i,max})$ , η παροχή λειτουργίας για το σύστημα κυμαίνεται από  $q_{min} = \min(q_{i,min})$  έως  $q_{max} = \sum_{i=1}^N q_{i,max}$
- Συνολική παραγόμενη ισχύς από μείγμα  $N = 2$  στροβίλων:

$$p_{tot} = \rho g h_n \left( \eta_1 \left( \frac{q_1}{q_{1,max}} \right) q_1 + \eta_2 \left( \frac{q_2}{q_{2,max}} \right) q_2 \right)$$

# Καμπύλες βαθμού απόδοσης

- Αναλυτική έκφραση των καμπυλών βαθμού απόδοσης στροβίλων → ευκολία, καλύτερη εποπτεία στους υπολογισμούς, εφαρμογή της σχέσης για κάθε διερχόμενη παροχή.



**Αναλυτική φόρμουλα για  $q_{min}/q_{nom} \leq q/q_{nom} \leq 1$**

$$\eta_T = \eta_{min} + \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{\frac{q}{q_{nom}} - \theta}{1 - \theta} \right)^a \right)^b \right) (\eta_{max} - \eta_{min})$$

*by Sakki (2020) and Sakki et al. (2021)*

$$\eta_T = \eta_{max} - \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{\frac{q}{q_{nom}} - 1}{1 - \theta} \right)^{a'} \right)^{b'} \right) (\eta_{max} - \eta_{min})$$

**Αναλυτική φόρμουλα για  $1 \leq q/q_{nom} \leq q/q_{max}$**

# Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Και οι δυο στρόβιλοι είναι τύπου Francis, από τον συνδυασμό του ύψους πτώσης (150 m) και των διερχόμενων παροχών.
- Παραδοχή μεγάλης διαμέτρου αγωγού πτώσης, ώστε οι γραμμικές απώλειες να θεωρούνται αμελητέες και το καθαρό ύψος πτώσης ίσο με το ολικό.
- Θεωρήσαμε ότι οι στρόβιλοι λειτουργούν έως  $q_{max} = q_{nom}$ .
- Οι παράμετροι  $a, b$  είναι οι αντίστοιχες παράμετροι σχήματος που χρησιμοποιεί η αναλυτική φόρμουλα της καμπύλης του βαθμού απόδοσης.

|  | Στρόβιλος T1 | Στρόβιλος T2 | Μείγμα |
|--|--------------|--------------|--------|
| Ονομαστική Ισχύς, $P$ (MW)                     | 7.40         | 1.00         | 8.40   |
| Μέγιστη παροχή, $q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 5.69         | 0.77         | 6.46   |
| Ελάχιστη παροχή, $q_{min}$ (m <sup>3</sup> /s) | 0.85         | 0.12         | 0.12   |
| Παράμετρος σχήματος $a$                        | 0.80         | 0.80         | -      |
| Παράμετρος σχήματος $b$                        | 3.75         | 3.75         | -      |

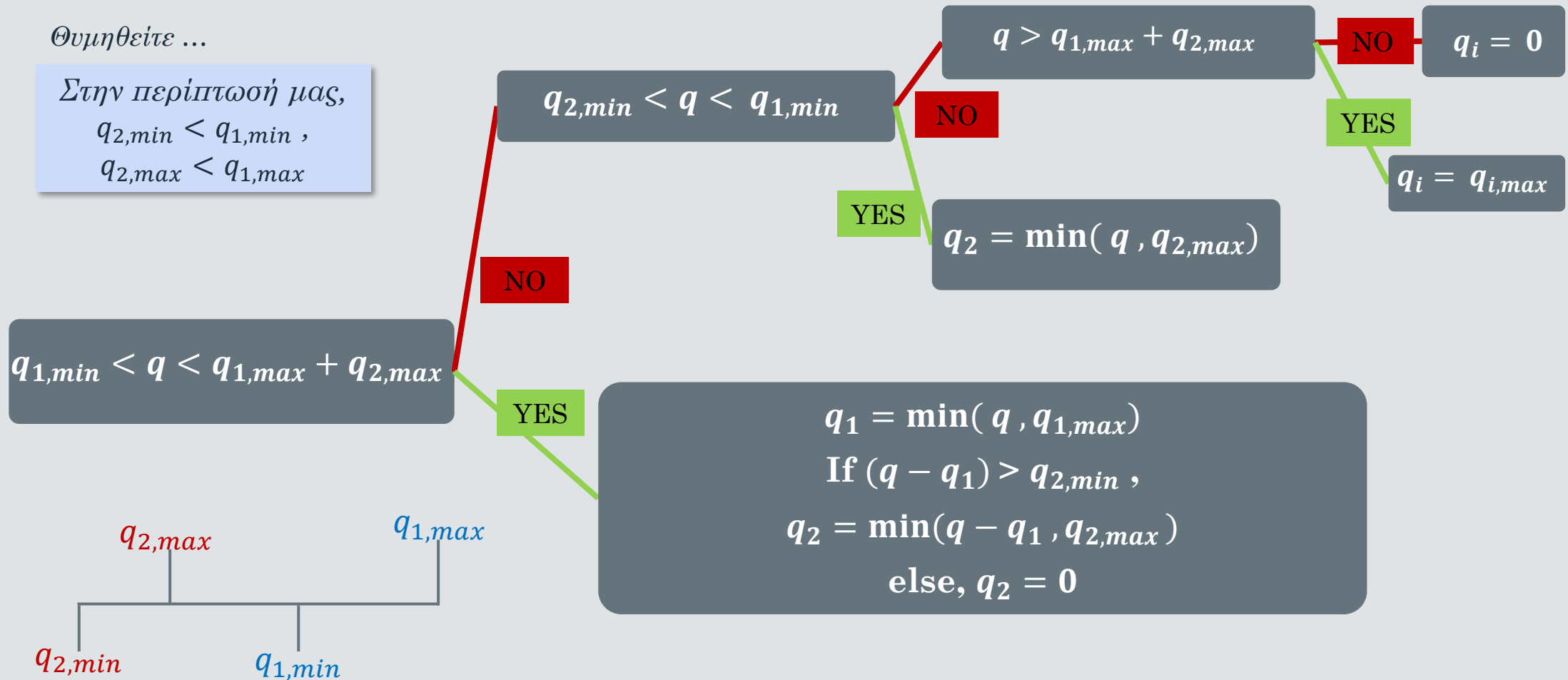
# Μέρος Ι: Βέλτιστος προγραμματισμός μείγματος στροβίλων



# Ιεραρχικός κανόνας

Θυμηθείτε ...

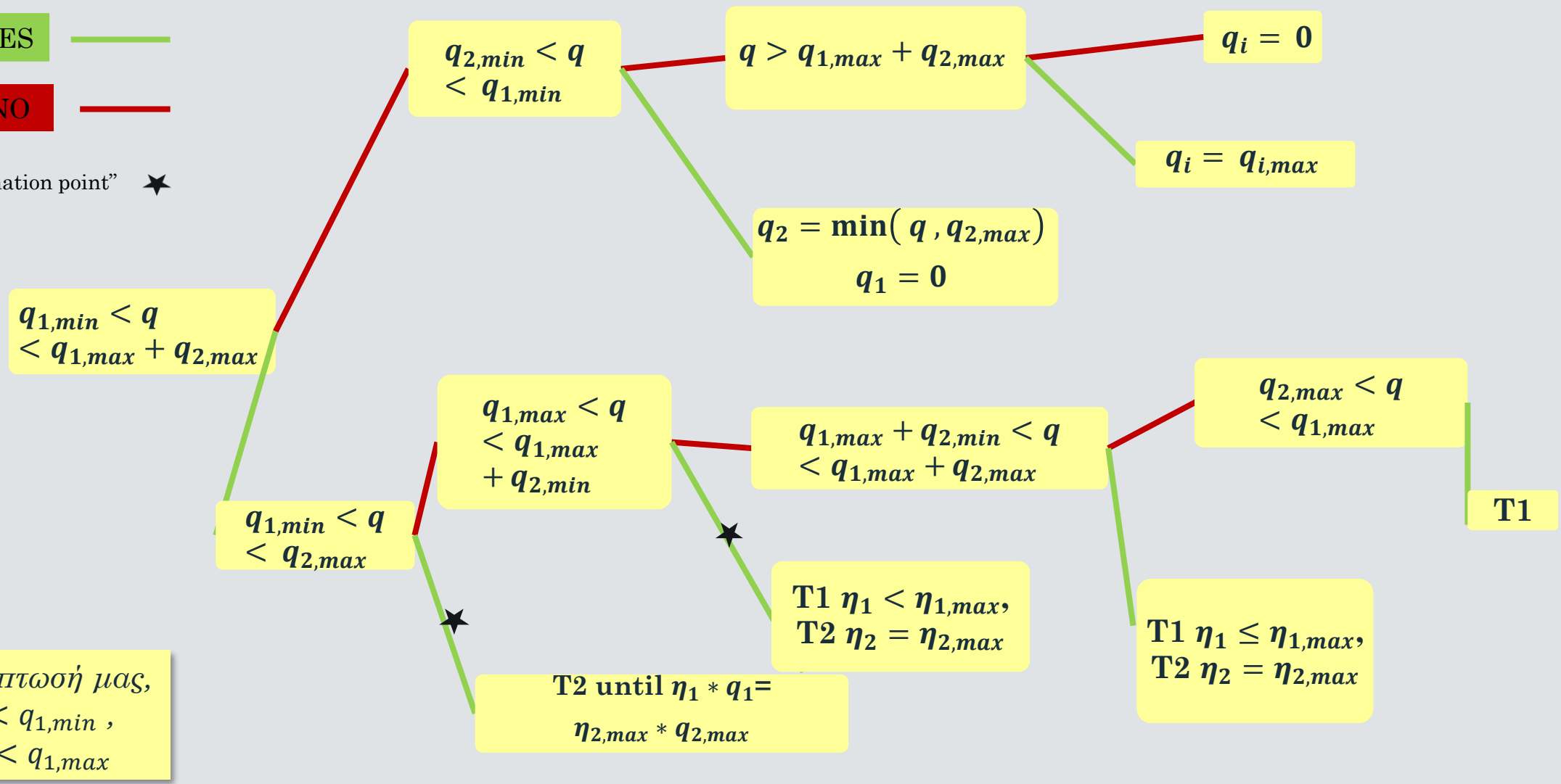
Στην περίπτωση μας,  
 $q_{2,min} < q_{1,min}$  ,  
 $q_{2,max} < q_{1,max}$



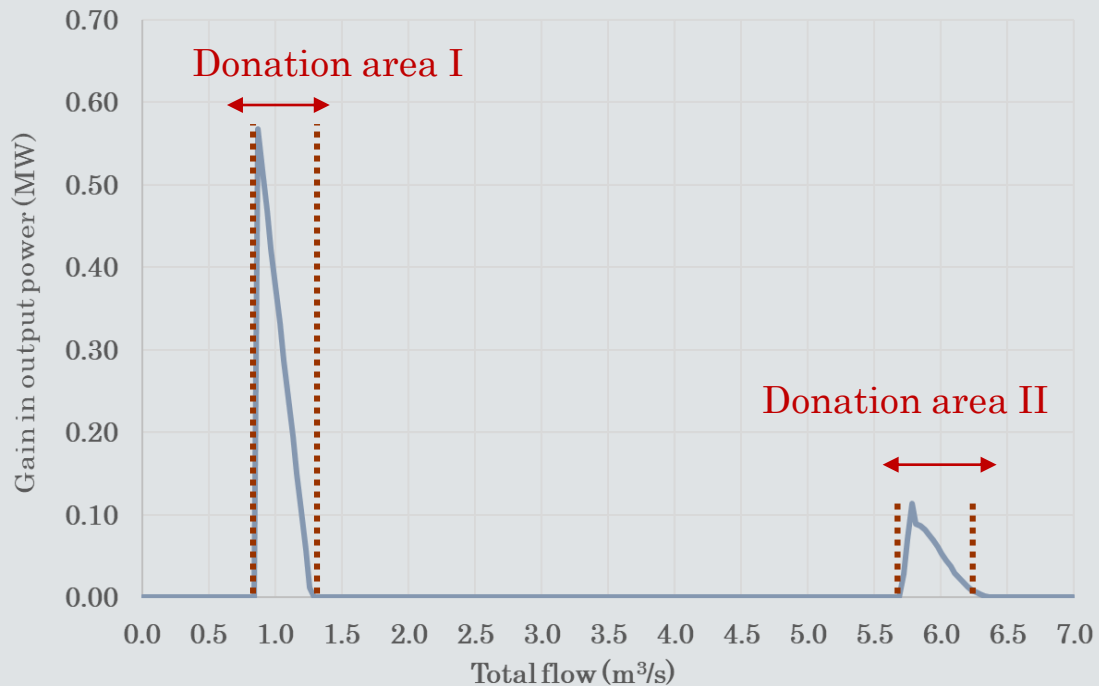
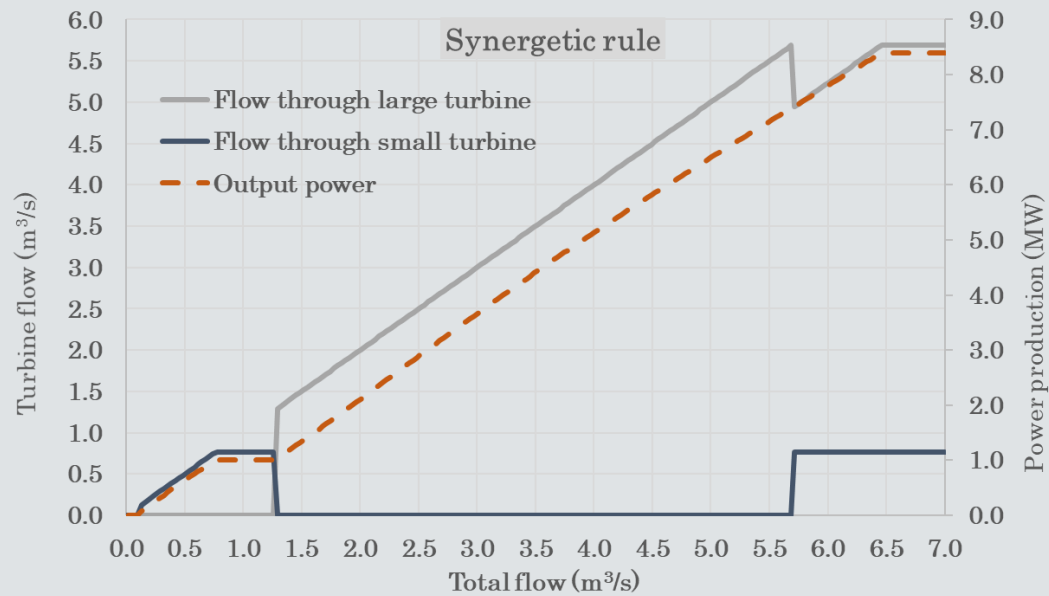
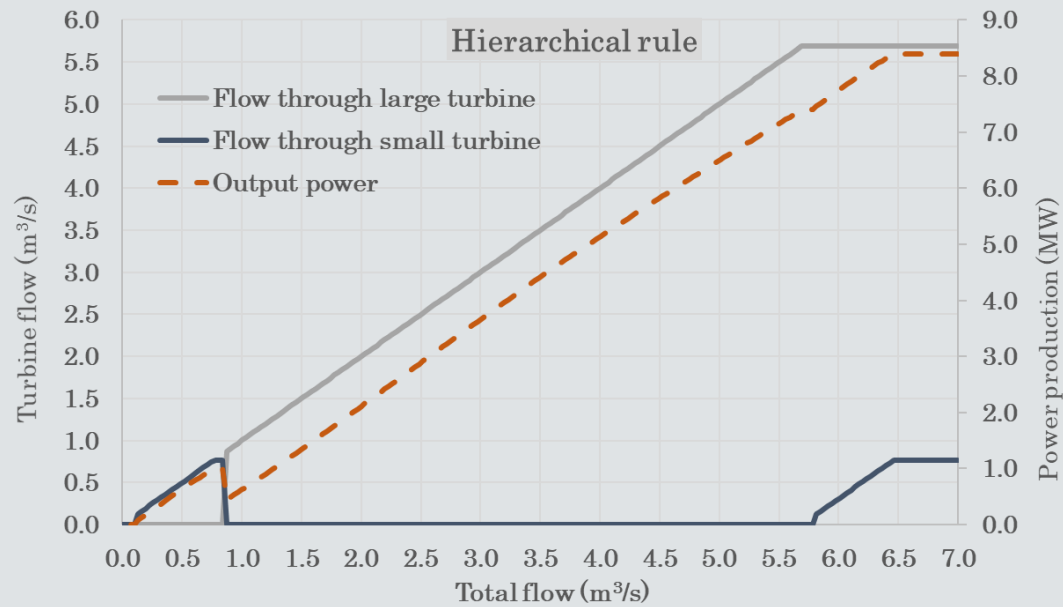
# Συνεργατικός κανόνας



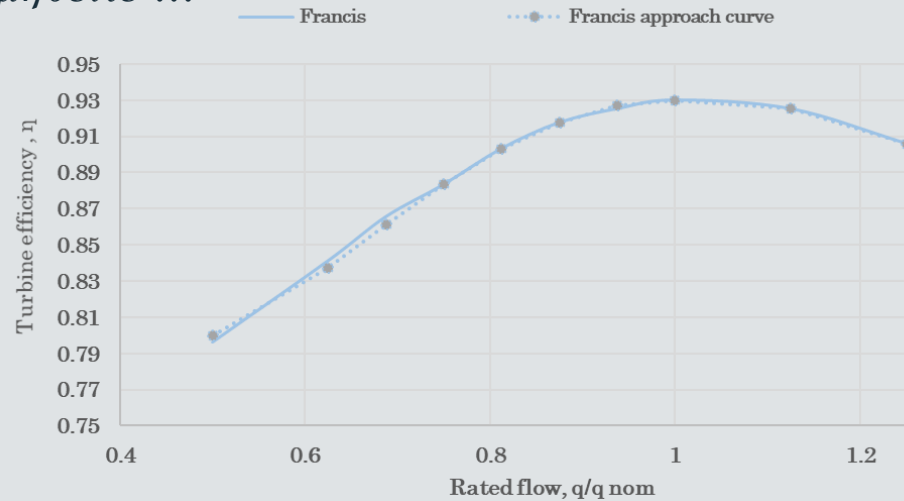
“Donation point” ★



Στην περίπτωση μας,  
 $q_{2,min} < q_{1,min}$ ,  
 $q_{2,max} < q_{1,max}$

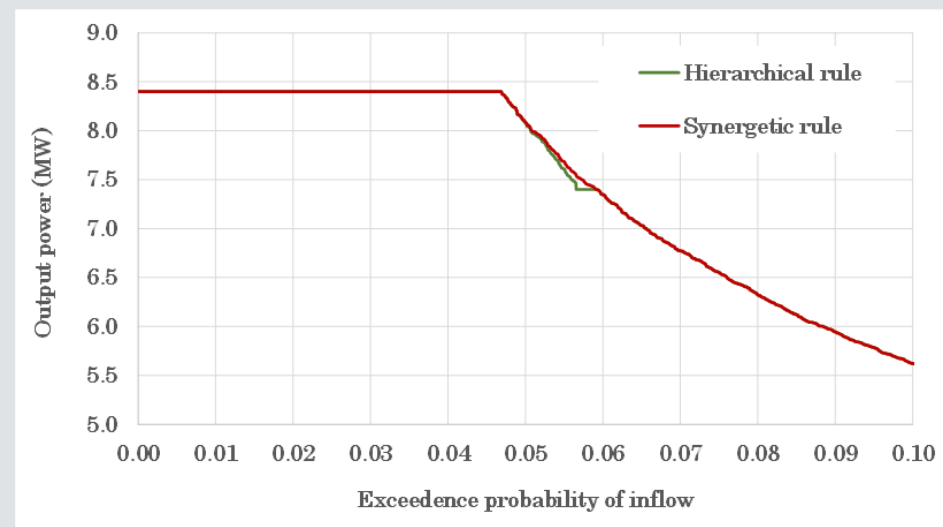
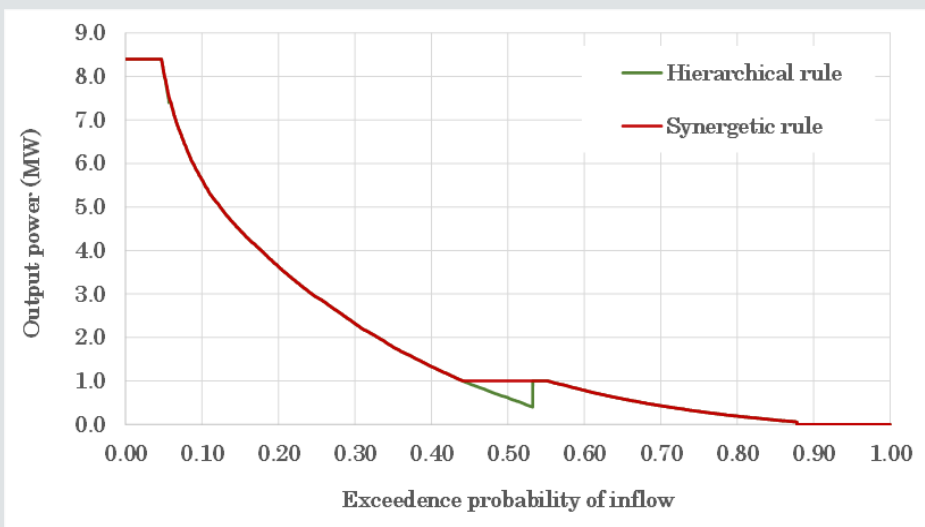
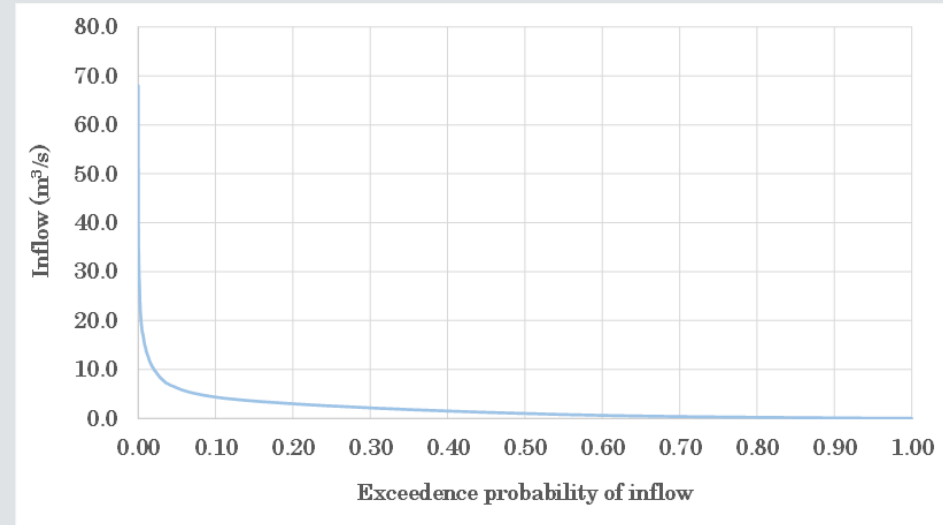
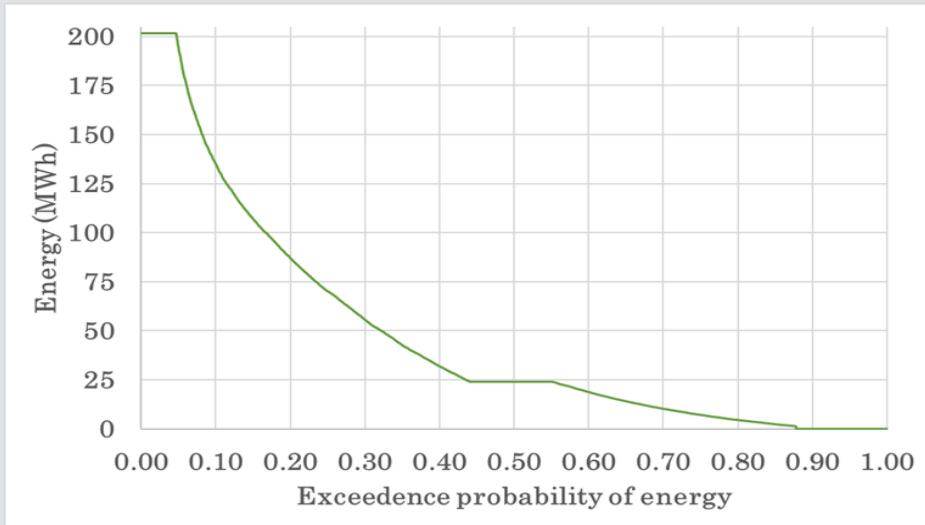


Θυμηθείτε ...



$$P_{tot} = \rho g h_n (\eta_1 q_1 + \eta_2 q_2)$$

# Υδρολογικό καθεστώς - κανόνες λειτουργίας



# Γενικευμένοι τύποι προγραμματισμού μείγματος στροβίλων – Διατύπωση μέσω αδιαστατοποιημένων σχέσεων

- $p_{max}^* = 1$  ,  $h_n^* = 1$
- $p_{1,max}^* = \varphi$  ,  $p_{2,max}^* = 1 - \varphi$
- $\varphi$ : δείκτης διαμερισμού ισχύος
- $q_{max} = q_{nom}$  ,  $p_{nom} = p_{max}$
- $q_{i,max}^* = \frac{p_{i,max}^*}{\rho g \eta_{i,max} h_n^*}$
- $q_{i,min}^* = \theta_i q_{i,max}^*$
- $q_{max}^* = \frac{1}{\rho q h_n^*} \left( \frac{\varphi}{\eta_{1,max}} + \frac{1-\varphi}{\eta_{2,max}} \right)$
- $q_{min}^* = \frac{1}{\rho q h_n^*} \min \left( \frac{\theta_1 \varphi}{\eta_{1,max}} , \frac{\theta_2 (1-\varphi)}{\eta_{2,max}} \right)$
- $u = q/q_{max}$  ,  $q^* = u q_{max}^*$  ,  $p_i^* = \rho q \eta_i(u) q^* h_n^*$
- $p_i^* = p_{1,i}^* + p_{2,i}^*$
- $p_i^*$ : αδιαστατοποιημένο άθροισμα ισχύος

# Σενάρια μείγματος στροβίλων

- $p_{ideal,i} = \rho g q^*(\varphi, \theta^i, \eta_{i,max}, a^i, b^i) h_n^*$ , θεωρητική ισχύς ιδεατού συστήματος στροβίλων ( $\eta_i = 1$ );
- $\varphi_i = \{0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8\}$ ,  $\theta_i = 0.15$  ή  $0.5, 0.1$  για Francis και Pelton αντίστοιχα;
- Δύο κατηγορίες σύγκρισης σεναρίων :

$$A) \Delta p_i = (p_{ideal,i} - p_i^*) \quad B) \Delta p_{i,operational} = (p_{synerg,i}^* - p_{hier,i}^*)$$

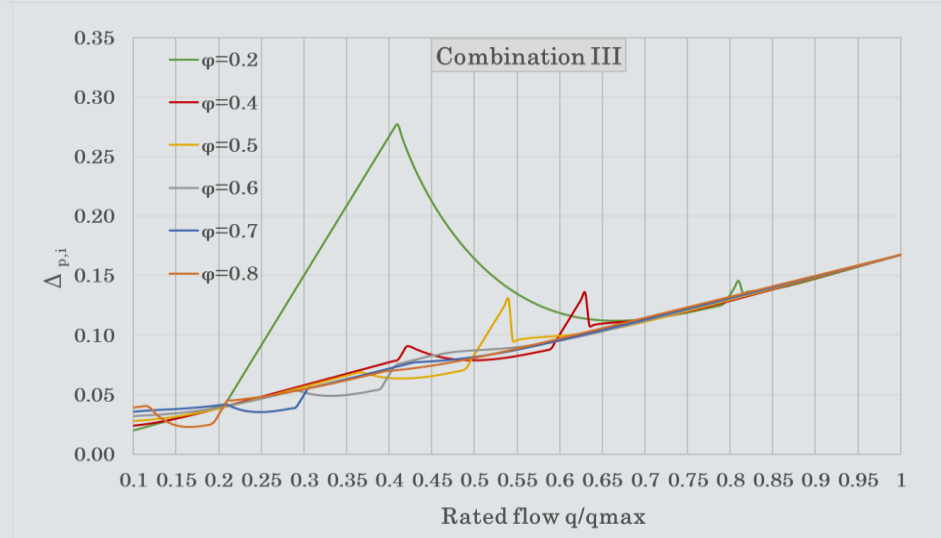
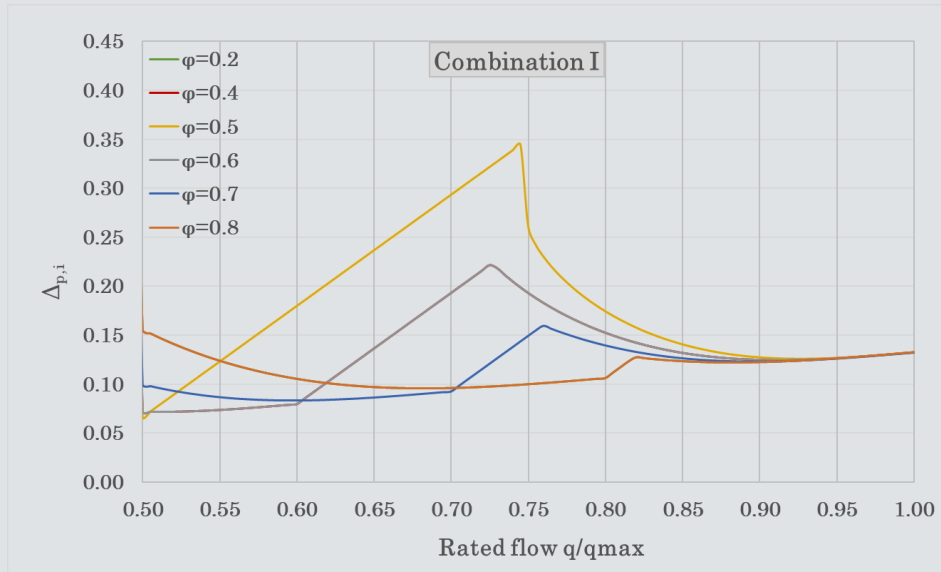
| Combination I        | Turbine 1 | Turbine 2 |
|----------------------|-----------|-----------|
| Turbine Type         | Francis   | Francis   |
| parameter $\theta_i$ | 0.50      | 0.50      |
| $\eta_{i,max}$       | 0.93      | 0.93      |
| $a_i$                | 0.78      | 0.78      |
| $b_i$                | 3.11      | 3.11      |

| Combination II       | Turbine 1 | Turbine 2 |
|----------------------|-----------|-----------|
| Turbine Type         | Francis   | Francis   |
| parameter $\theta_i$ | 0.15      | 0.15      |
| $\eta_{i,max}$       | 0.93      | 0.93      |
| $a_i$                | 1.00      | 1.00      |
| $b_i$                | 2.11      | 2.11      |

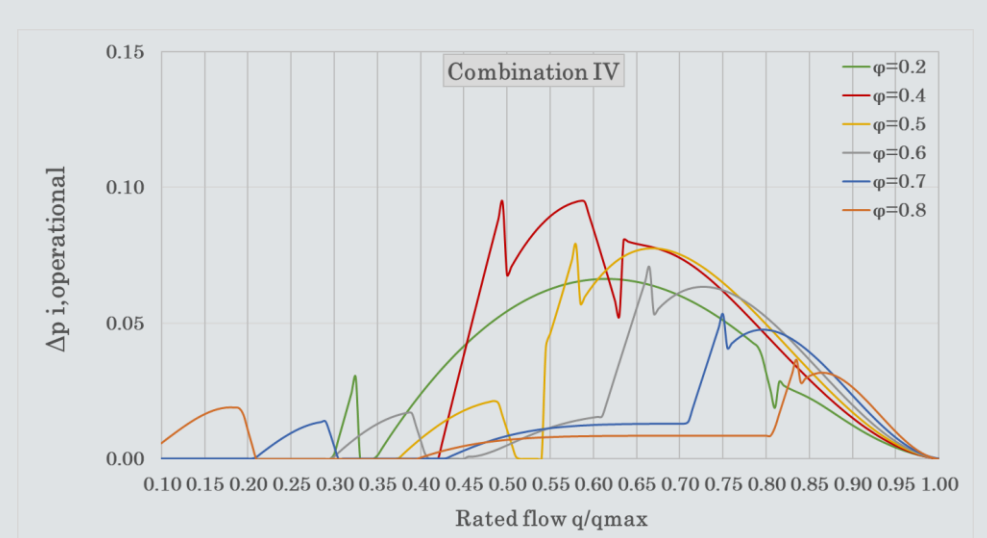
| Combination III      | Turbine 1 | Turbine 2 |
|----------------------|-----------|-----------|
| Turbine Type         | Pelton    | Francis   |
| parameter $\theta_i$ | 0.10      | 0.50      |
| $\eta_{i,max}$       | 0.89      | 0.93      |
| $a_i$                | 1.13      | 0.78      |
| $b_i$                | 12.8      | 3.11      |

| Combination IV       | Turbine 1 | Turbine 2 |
|----------------------|-----------|-----------|
| Turbine Type         | Pelton    | Francis   |
| parameter $\theta_i$ | 0.10      | 0.15      |
| $\eta_{i,max}$       | 0.89      | 0.93      |
| $a_i$                | 1.13      | 1.00      |
| $b_i$                | 12.8      | 2.11      |

**A.**  $\Delta p_i = (p_{ideal,i} - p_i^*)$



**B.**  $\Delta p_{i,operational} = (p_{synerg,i}^* - p_{hier,i}^*)$



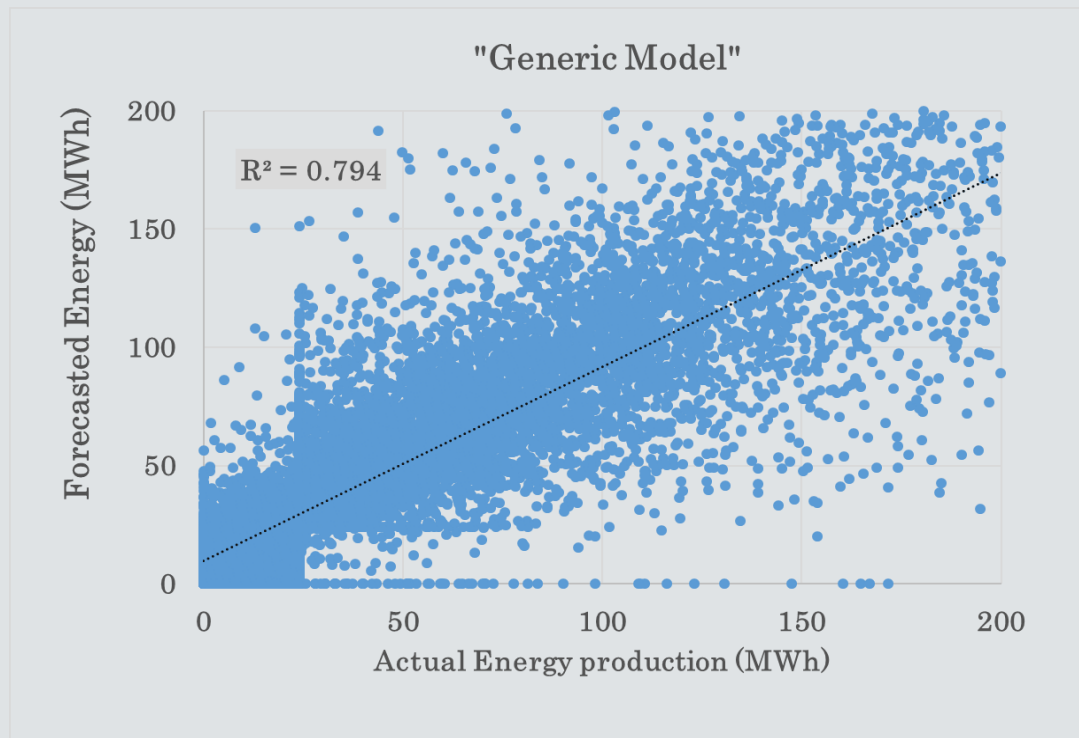
# Μέρος II: Μέθοδοι πρόγνωσης ενέργειας επόμενης ημέρας



# Άμεση μέθοδος πρόγνωσης

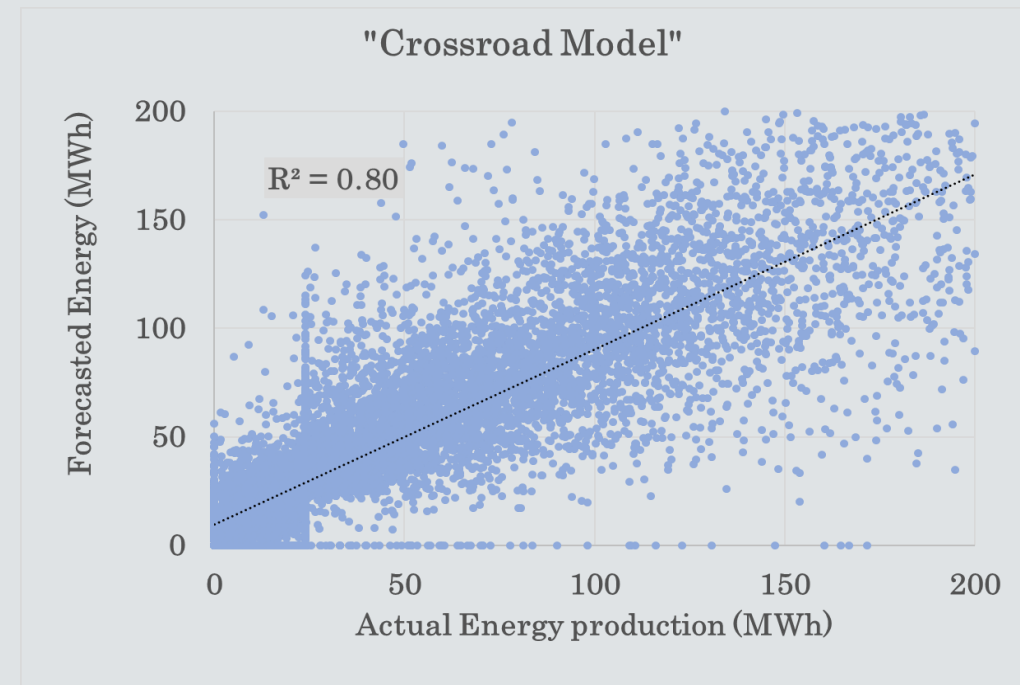
- Generic Model

$$E_{t+1} = \begin{cases} 4.79 (E_t)^{0.48} (E_{t-1})^{0.12} (p_t)^{0.15}, & p_t > 0.1 \text{ mm} \\ E_t, & p_t \leq 0.1 \text{ mm} \end{cases}$$



- Crossroad Model

$$E_{t+1} = \begin{cases} 3.88 (E_t)^{0.54} (E_{t-1})^{0.12} (p_t)^{0.16}, & p_t > 0.1 \text{ mm} \\ 1.51 (E_t)^{0.63} (E_{t-1})^{0.25}, & p_t \leq 0.1 \text{ mm} \end{cases}$$



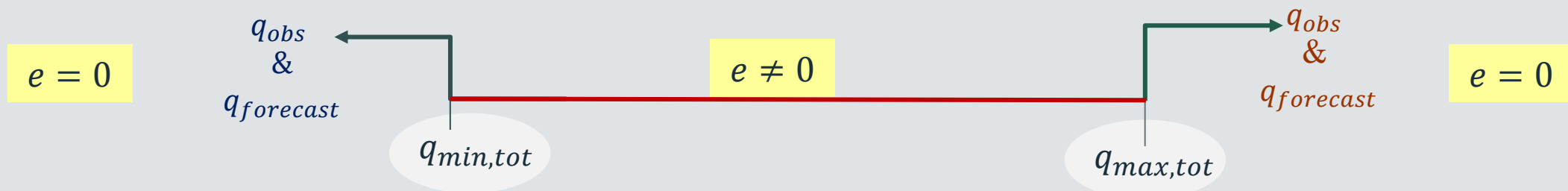
# Έμμεση μέθοδος πρόγνωσης

Δύο προσεγγίσεις βαθμονόμησης παραμέτρων:

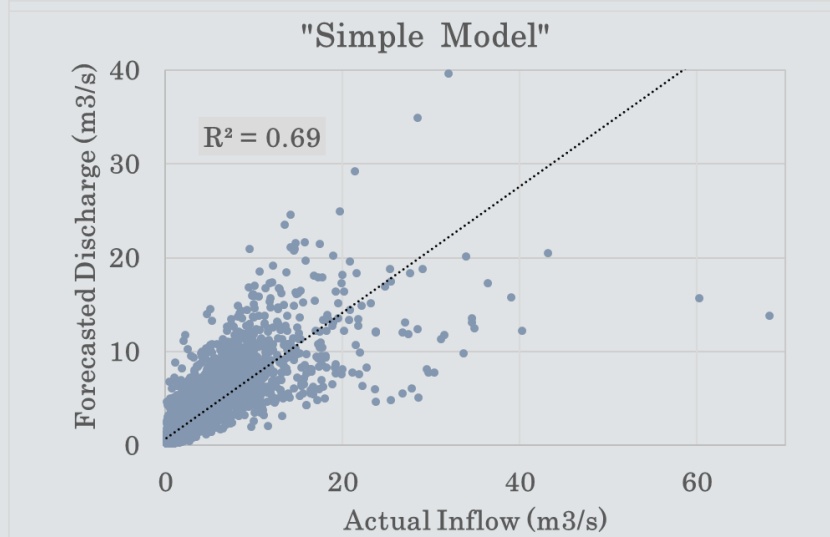
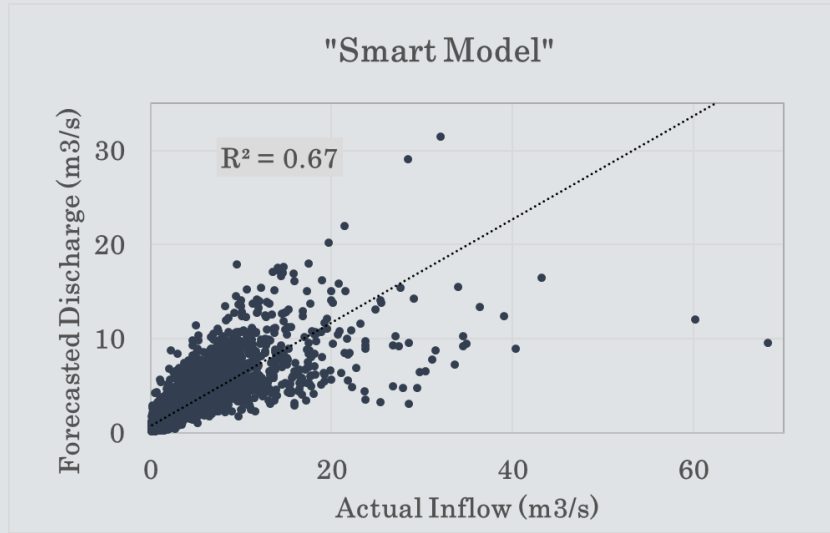
$$q_{t+1} = \begin{cases} a_1 (q_{min5}) + \beta_1 (q_t) + \gamma_1 (q_{meant}), & p_t < 0.1 \text{ mm} \\ a_2 (q_{min5}) + \beta_2 (q_t) + \gamma_2 (q_{meant}) + \delta(p_t), & p_t \geq 0.1 \text{ mm} \end{cases}$$

- I. **Simple Model:** εξασφάλιση βέλτιστης βαθμονόμησης με ελαχιστοποίηση του RMSE;
- II. **Smart Model:** προσαρμογή του RMSE στο εύρος λειτουργίας των στροβίλων, συμβολή γνώσης των χαρακτηριστικών του συστήματος για τον ορισμό του όρου σφάλματος;

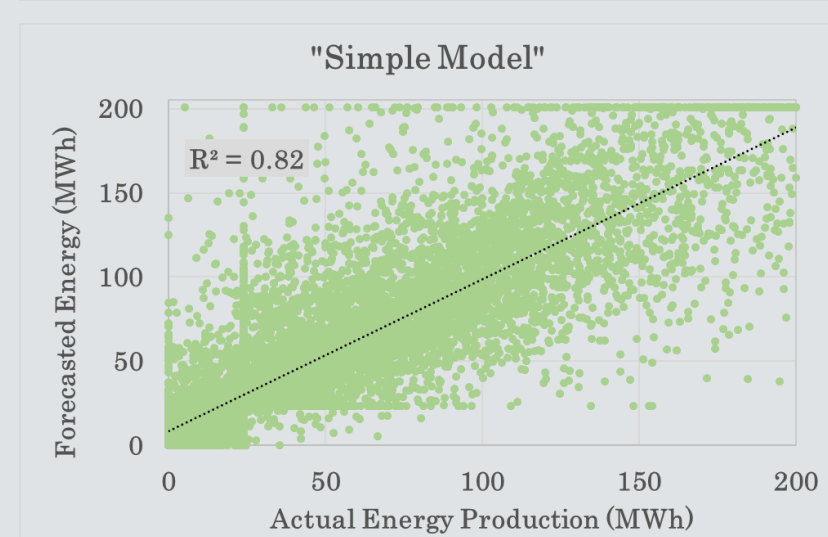
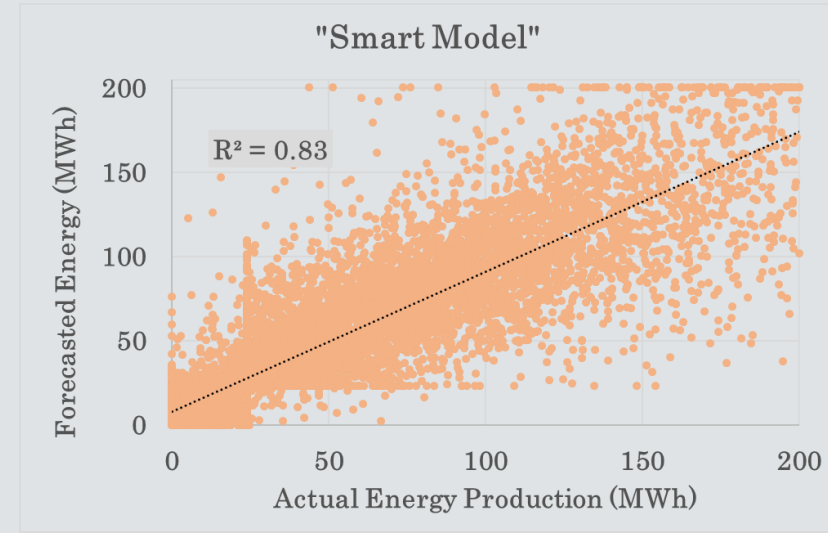
$$e = \begin{cases} q_{max,tot} - q_{forecast}, & q_{obs} > q_{max,tot} \text{ and } q_{forecast} < q_{max,tot} \\ q_{forecast} - q_{min,tot}, & q_{obs} < q_{min,tot} \text{ and } q_{forecast} > q_{min,tot} \\ q_{obs} - q_{forecast}, & q_{obs} > q_{min,tot} \text{ and } q_{obs} < q_{max,tot} \end{cases}$$



# Έμμεση μέθοδος πρόγνωσης

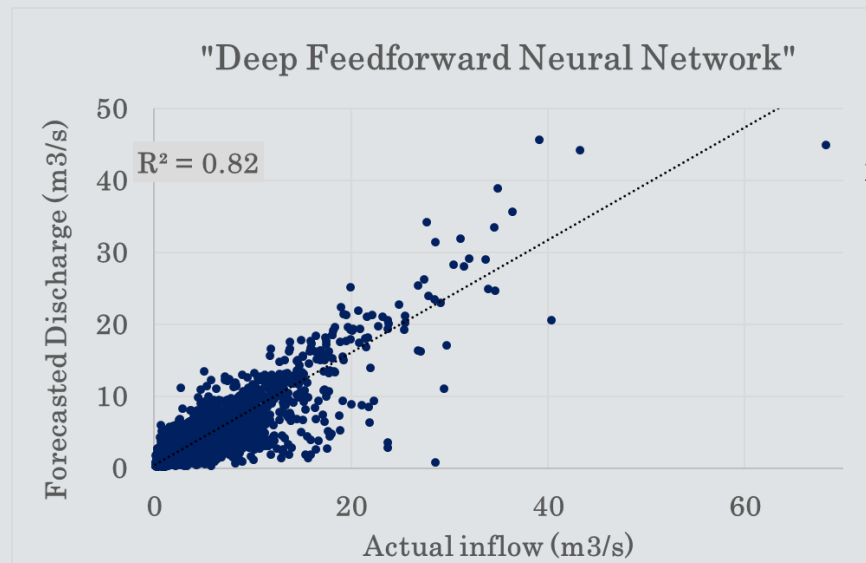


Συνεργατικός κανόνας

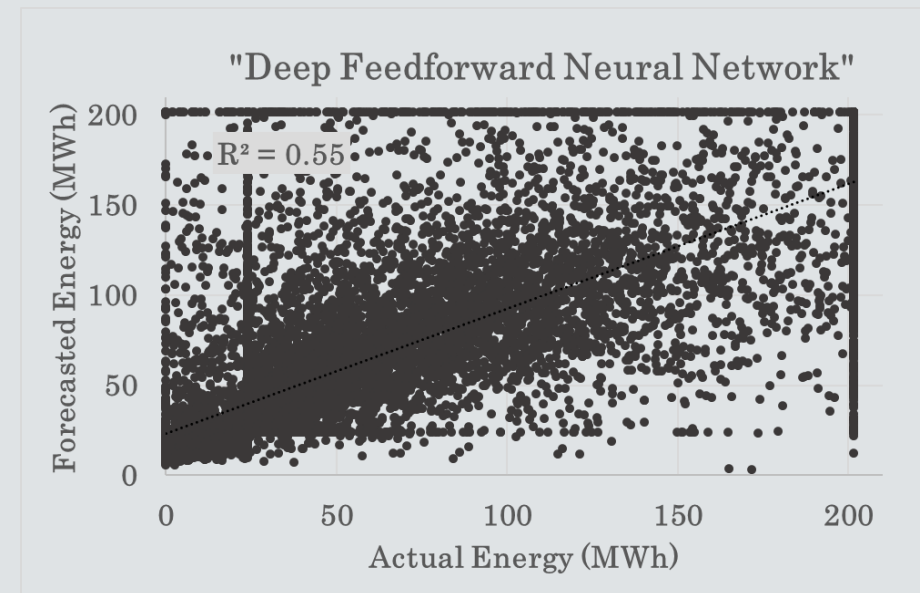


# Machine Learning Model (DNN) – εξελιγμένο μοντέλο πρόγνωσης

- δεν λαμβάνει υπόψιν του την τεχνική πληροφορία- απλούστεροι υπολογισμοί και τεχνολογικά εργαλεία;
- τρία επίπεδα 128, 64 και 32 νευρώνες;
- δεδομένα εισόδου: παροχή των τελευταίων 5 ημερών, βροχή των προηγούμενων 2 ημερών.



Συνεργατικός  
κανόνας



# Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων πρόγνωσης ενέργειας

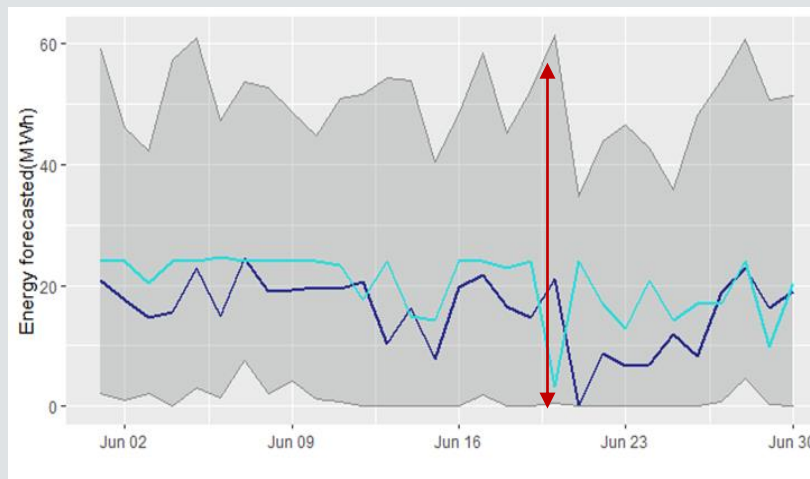
Efficiency,  $E_{t,benchmark} = \text{mean}(E_{t,obs})$   
 Modified efficiency,  $E_{t,benchmark} = E_{t-1,obs}$

$$F = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (E_{t,obs} - E_{t,forecast})^2}{\sum_{t=1}^n (E_{t,obs} - E_{t,benchmark})^2}$$

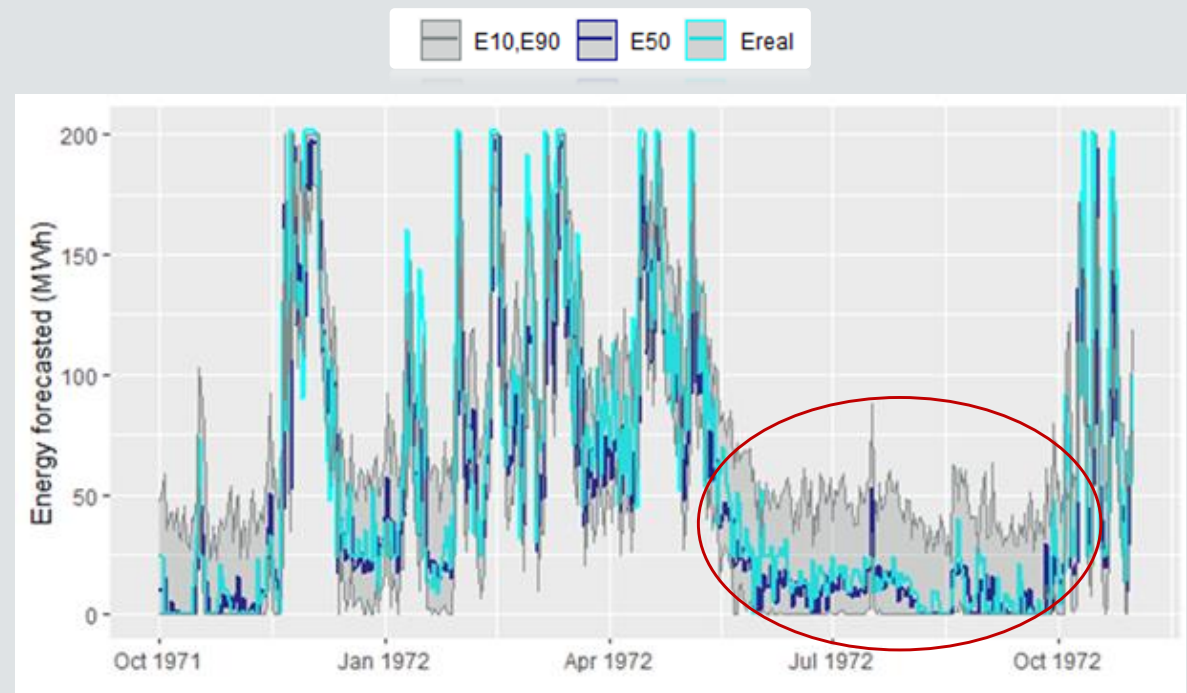
| Model type       | Efficiency of Energy |              |              | Modified efficiency of Energy |              |              | Energy error statistics |                |                    |                       |
|------------------|----------------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
|                  | Calibr.              | Valid.       | Full data    | Calibr.                       | Valid.       | Full data    | Mean (MWh)              | St. dev. (MWh) | Coeff. of skewness | Lag-1 autocorrelation |
| Naïve            | n/a                  | n/a          | 0.766        | n/a                           | n/a          | n/a          | 0.00                    | 27.76          | 1.21               | -0.119                |
| Direct Generic   | 0.782                | 0.809        | 0.794        | 0.171                         | 0.166        | 0.169        | -1.11                   | 25.28          | 1.34               | -0.012                |
| Direct Crossroad | 0.790                | 0.813        | 0.799        | 0.201                         | 0.182        | 0.193        | -0.51                   | 24.86          | 1.45               | 0.043                 |
| Indirect Simple  | 0.817                | 0.796        | 0.807        | 0.228                         | 0.226        | 0.227        | -3.83                   | 24.11          | -0.37              | 0.079                 |
| Indirect Smart   | <b>0.848</b>         | <b>0.819</b> | <b>0.833</b> | <b>0.356</b>                  | <b>0.314</b> | <b>0.331</b> | <b>0.112</b>            | <b>22.64</b>   | <b>1.23</b>        | <b>0.066</b>          |
| DNN              | n/a                  | n/a          | 0.550        | n/a                           | n/a          | -0.977       | -0.99                   | 39.04          | -0.42              | 0.540                 |

# Παράγοντας της αβεβαιότητας – Στάσιμο μοντέλο πρόγνωσης

- πλήθος συνθετικών τιμών του σφάλματος  $w_t = E_{t,obs} - E_{t,for}$ .
- ακολουθεί Γάμα Κατανομή.
- συντελεστής ασυμμετρίας = 1.23.
- συντελεστής αυτοσυσχέτισης = 0.066.



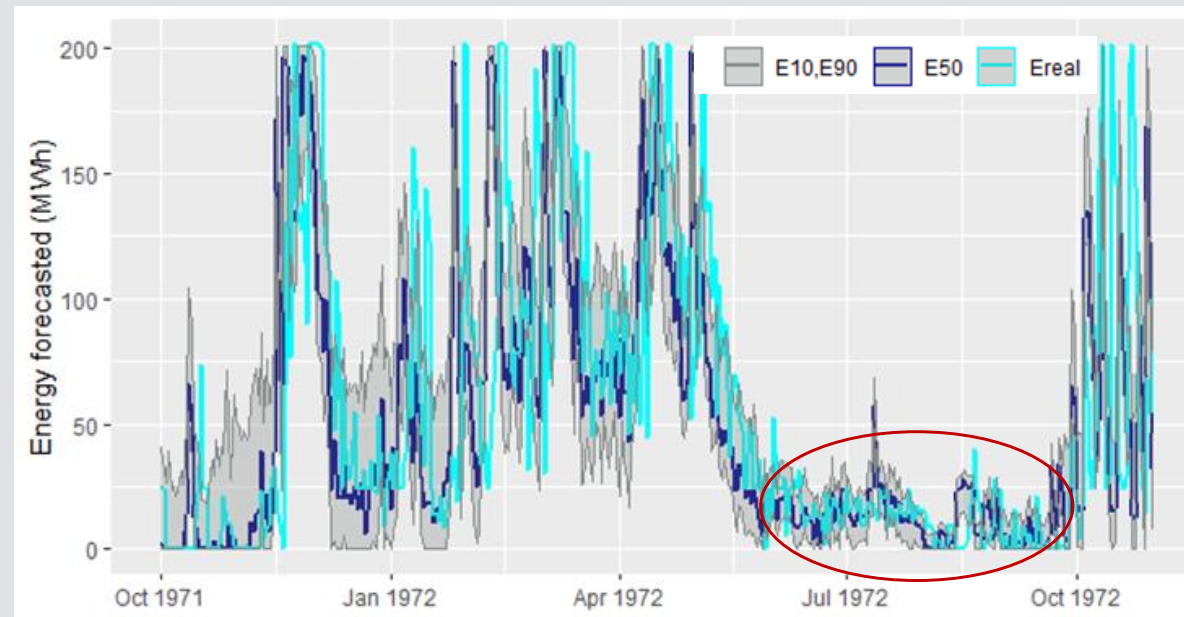
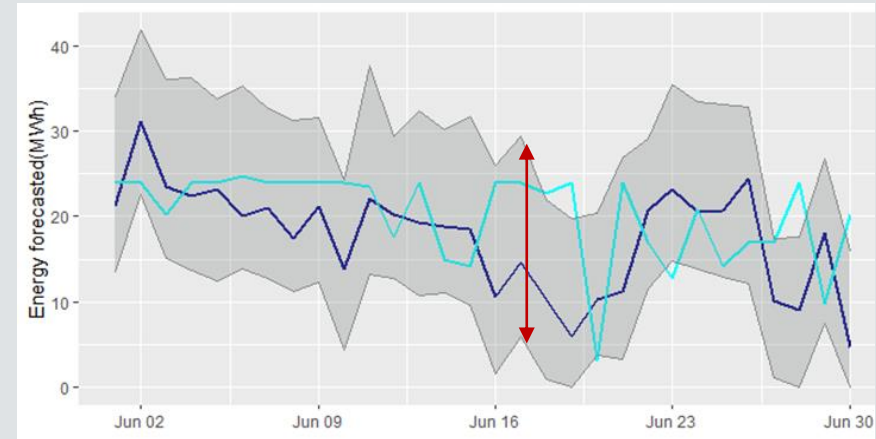
- $E_t = E_{t,ντετερεμ} + w_{t,συνθ}$ .
- Μεταφορά του υψηλού σφάλματος των υγρών μηνών στους ξηρούς μήνες.





# Κυκλοστάσιμο μοντέλο πρόγνωσης

| Month | Mean (MWh) | Standard deviation (MWh) | Skewness | Lag-1 correlation |
|-------|------------|--------------------------|----------|-------------------|
| JAN   | 0.82       | 28.65                    | 1.23     | 0.069             |
| FEB   | 1.59       | 29.07                    | 0.87     | 0.138             |
| MAR   | 4.87       | 28.05                    | 0.95     | 0.066             |
| APR   | 1.91       | 26.53                    | 0.48     | 0.059             |
| MAY   | 1.53       | 19.06                    | 1.37     | 0.089             |
| JUN   | -0.16      | 8.42                     | 0.95     | -0.062            |
| JUL   | 0.11       | 7.74                     | -0.25    | -0.014            |
| AUG   | -0.72      | 7.11                     | -1.85    | 0.056             |
| SEP   | -1.91      | 11.06                    | -1.39    | 0.044             |
| OCT   | -2.51      | 20.75                    | 1.76     | -0.050            |
| NOV   | -0.45      | 31.51                    | 1.34     | 0.043             |
| DEC   | -2.74      | 30.64                    | 0.84     | 0.045             |

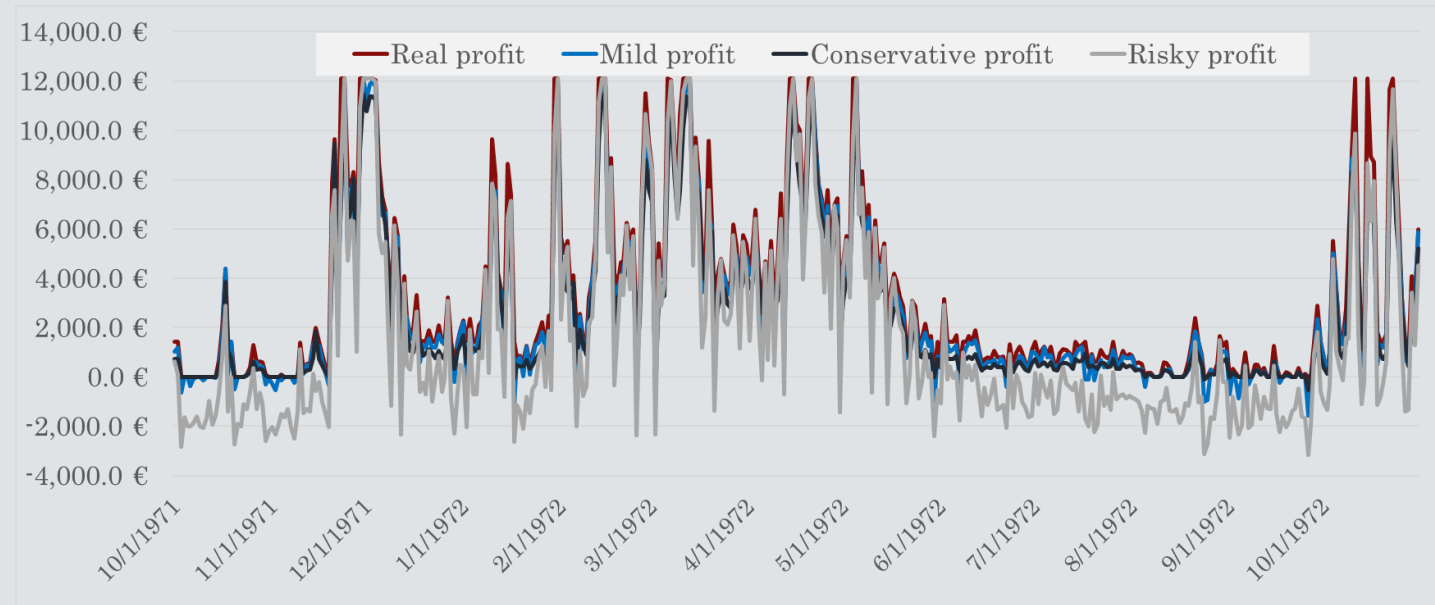


# Πολιτικές πώλησης ενέργειας της επόμενης ημέρας

- Εφαρμογή Smart Model με κυκλοστάσιμη μέθοδο προσέγγισης αβεβαιότητας.
- Ρυσοκίνδυνη, ασφαλής και συντηρητική πολιτική πώλησης με χρήση των 10, 50 και 90% ποσοστημορίων.

## Δεδομένα αγοράς ενέργειας (€/MWh)

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Τιμή πώλησης εγγυημένης ενέργειας    | 60 |
| Τιμή πώλησης δευτερεύουσας ενέργειας | 30 |
| Ρήτρα ελλείμματος ενέργειας          | 50 |





# Βασικά συμπεράσματα & στόχοι

## Μελετήθηκαν:

- a) Επέκταση αναλυτικής σχέσης βαθμού απόδοσης στροβίλων διαφόρων τύπων.
- b) Γενίκευση-αδιαστατοποίηση σχέσεων λειτουργίας συστήματος στροβίλων.
- c) Ανάπτυξη συνεργατικού κανόνα και αντιπαράβολή με τον ιεραρχικό.
- d) Σημασία του παράγοντα της πληροφορίας στα προβλήματα πρόγνωσης.
- e) Ένταξη της αβεβαιότητας & εποχικότητας στην πρόγνωση της παραγωγής ενέργειας.
- f) Πρακτική εφαρμογή σε πιθανές πολιτικές αγορές.

## Στοχεύουμε:

1. Αξιολόγηση του συνεργατικού κανόνα σε συνάρτηση με το υδρολογικό καθεστώς.
2. Ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών του έργου στη διαδικασία βαθμονόμησης του DNN.
3. Επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε μια αποδοτική και αξιόπιστη μεθοδολογία πρόγνωσης, περιορίζοντας τις απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους, τεχνογνωσία και δεδομένα.



Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας...